

## 응력파를 이용한 비파괴 탐상기법의 수치해석 적용성에 관한 연구

### A Study on Applicability of Numerical Analyses for Stress Wave-Based NDE Techniques

이 영 준\*                      이 종 세\*\*  
Lee, Young Jun              Lee, Jong Seh

---

#### ABSTRACT

Simulation programs have been developed and used as an attempt to improve the accuracy of Non-Destructive Evaluation(NDE) techniques. The applicability of these programs is very limited, however, because it is difficult to describe the delicacy of the propagation of stress waves. To investigate the applicability of the finite element analysis for stress wave-based NDE techniques numerical simulation for Impact-Echo method and SASW method is performed. The numerical studies are performed to determine the essential parameters such as contact time of impact load, mesh size and time step size. These studies show that the choice of parameter is very important for improving the accuracy and confidence of the numerical procedure and, thereby, the applicability of the numerical analysis for stress wave-based NDE techniques

**Keywords** : *Non-destructive Evaluation(NDE), stress wave, Impact-Echo method, SASW method, finite element method, essential Parameter*

---

#### 1. 서 론

구조물 결함탐사나 강도평가시 사용되는 비파괴 탐상기법은 점차로 그 중요성이 부각되어지고 있으나 아직까지 국내의 기술력은 선진국에 비해 초보단계에 머물러 있으며 기술인력 부족 및 실험결과분석에 대한 신뢰성 문제가 발생하는 등 적절한 운용이 미흡한 실정이다. 이중 비파괴 실험결과 신뢰성 결여는 가장 시급한 문제로 대두되고 있으며 이러한 문제를 해결하기 위하여 반복실험 및 시뮬레이션 프로그램의 개발 등 많은 연구가 수행되고는 있지만 정확성과 적용성의 한계를 도출하고 있다. 또한 상용 유한요소 해석프로그램을 이용한 수치해석 역시 해석변수들에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 그러나 유한요소법을 이용한 수치해석은 응력파의 전파특성을 잘 모사할 수 있고 다양한 분야에 적용할 수 있는 장점을 가지고 있어 적절한 해석

---

\*청석 엔지니어링 사원(jun1735@hanmail.net)

\*\*정희원 · 한양대학교 토목환경공학과 교수(jonglee@hanyang.ac.kr)

변수의 결정과 모형화 작업이 이루어진다면 비파괴 실험결과분석을 위한 비교·검증 수단으로서의 역할을 충분히 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

유한요소법을 이용한 수치해석시 해석변수의 결정은 수치결과의 정확성과 프로그램운용의 효율성을 결정짓는 중요한 변수로 작용하게 된다. 따라서 본 연구에서는 충격하중의 접촉시간, 요소크기 및 해석시간간격 등 해석변수들에 대한 연구를 선행하여 적절한 해석변수를 결정하고, 응력파를 이용한 비파괴 탐상기법 중 충격반향기법과 SASW 기법에 대한 적용성을 알아보았다.

## 2. 수치해석의 정확성 및 효율성을 위한 선행연구

### 2.1 해석프로그램 및 수치해석모델 설정

일반적으로 속도 및 전파특성이 다른 다양한 파로 구성되어 있는 응력파에 대한 시뮬레이션은 어려운 문제이며 더구나 경계면에서 반사되어지는 파나 균열선단에서 회절되어지는 파에 대한 해석은 아직까지도 많은 학자들에 의해 연구되고 있는 분야이다. 이에 본 연구에서는 상용유한요소해석프로그램 중 응력파의 전파 특성을 비교적 잘 모사할 수 있는 ANSYS를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석시 대상모델은 선형 탄성체이며 균질하다는 가정으로 2차원 평면변형율조건에서 과도동적해석(Transient Dynamic Analysis)을 수행하였으며, 해석에는 4절점 삼각형 요소를 사용하였다.

### 2.2 입력물성 및 입력하중

본 연구에서 사용한 수치모형의 재료는 일반적으로 구조물에 많이 사용되어지는 콘크리트로 하였으며, 각각의 설계강도에 따른 탄성계수와 포아송비, 밀도를 추정하여 사용하였다. 일반적으로 포아송비는 보통과 경량 콘크리트에서 0.15~0.2 사이에서 변하며, 본 연구에서는 0.2를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 또한 밀도는 보통중량의 콘크리트로 가정하여  $2400\text{kg/m}^3$ 를 사용하였다.

그림 1은 수치해석시 사용된 삼각형 충격하중을 나타내고 있으며, 하중의 최대 진폭 크기는  $0.3\text{ N/m}$ 로 가정하여 사용하였다.

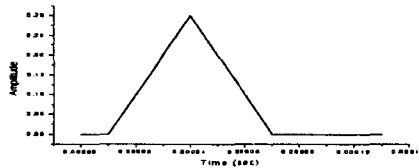


그림 1 삼각형 충격선하중

### 2.3 충격반향기법의 해석변수의 결정

유한요소법을 이용한 수치해석시 정확한 해석변수의 결정은 해석의 정확성 및 효율성 측면에서 중요한 문제이다. 따라서 본 연구에서도 수치해석을 위한 선행과제로 해석변수들에 관한 연구를 수행하였으며, 특히 충격반향기법의 수치해석시 중요한 변수로 작용하는 충격하중의 접촉시간과 요소크기, 해석시간간격에 대한 연구를 선행하였다. 선행연구를 위한 수치해석은 충격반향기법을 이용한 모형의 두께를 결정하는 과정을 사용하였으며, 해석모델의 물성치는 콘크리트 설계강도  $560\text{kgf/cm}^2$ 에 대하여 포아송비, 밀도를 각각 0.2,  $2400\text{kg/m}^3$ 를 적용하였다. 이때 대상체 내부에 전파되는 P파의 속도는 식 (1) 및 (2)에 의해 결정하게 된다.

$$C_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$C_{PP} = 0.96 \times C_P \quad (2)$$

여기서,  $C_P$  : 이론식에 의한 P파 속도,  $C_{PP}$  : 형상계수를 도입한 P파 속도

$E$  : 탄성계수,  $\nu$  : 포아송비,  $\rho$  : 밀도

본 연구에서는 충격반향실험시 정확성을 향상시키기 위해 Sansalone 등(1997)이 제시한 형상계수(0.96)를 사용하여 P파 속도를 결정하였으며 수치해석결과와 비교하였다. 그림 2는 해석변수를 결정하기 위한 기본 모형을 나타내고 있으며, 수신기(receiver)에서 얻어진 시간영역에서의 가속도 성분을 FFT변환을 통해 공진주파수를 결정하여 결과를 도출하였다.

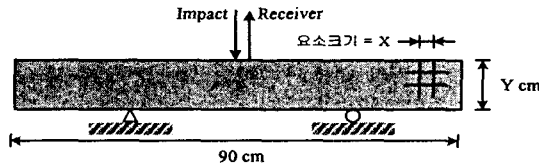


그림 2 해석변수 결정을 위한 수치해석 모형

### 2.3.1 접촉시간(contact time)의 결정

충격하중을 작용함에 있어 하중의 접촉시간은 응력파의 파장을 결정하는 중요한 요소로 작용하게 되며, 이는 두께측정이나 결합위치를 측정하는 충격반향기법에 중요한 변수로 작용하게 된다. 따라서 본 연구에서는 대상체의 두께에 따라 충격하중의 접촉시간을 달리하여 수치해석을 수행하였으며, 각 두께에서의 허용 접촉시간영역을 도출하였다. 대상체의 두께는 10, 30cm로 하였으며 접촉시간을 0.00002초씩 변화하여 수치해석을 수행하였다.

두께의 변화에 대한 수치해석결과, 일정한 공진주파수를 갖는 접촉시간영역이 존재함을 알 수 있었으며, 형상계수를 도입한 P파 속도의 이론값과 접촉시간영역에서의 공진주파수를 이용하여 얻어진 두께가 정확한 값을 도출하고 있음을 알 수 있었다. 각 두께별 수치해석결과는 그림 3에 나타내고 있으며 두께계산은 표 1에 나타내었다.

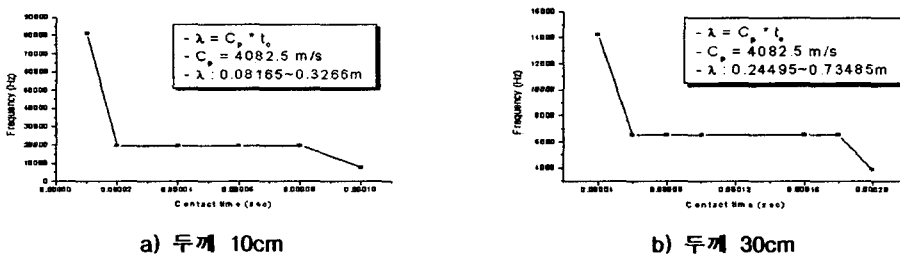


그림 3 두께에 따른 접촉시간영역

표 1 접촉시간영역에서 얻어진 공진주파수를 이용한 두께결정

수치모델 두께 (cm)	접촉시간영역 (sec)	공진주파수, f (Hz)	P파 속도, $C_{PP}$ (m/s)	수치해석을 통한 두께, T $T = C_{PP} / 2f$ (cm)
10	0.00002-0.00008	19531.25	3919.2	10.033
30	0.00006-0.00018	6542.97		29.95

그림과 표에서 보는 바와 같이 정확한 두께를 결정할 수 있는 허용 접촉시간영역은 모형의 두께가 10cm 일 경우는 0.00002~0.00008초이고, 30cm일 경우는 0.00006~0.00018초임을 알 수 있다.

### 2.3.2 요소크기의 결정

시간영역에서 동적해석을 수행할 경우 수치해석의 정확성과 효율성을 향상시키기 위해서는 요소크기의 최적화는 반드시 선행되어야 한다. 본 절에서는 최적의 요소크기를 결정하기 위하여 두께 10cm의 콘크리트 슬라브에 대한 수치해석을 수행하였다. 응력파의 파장을 결정하기 위한 충격하중의 접촉시간은 앞절에서 결정된 두께 10cm의 허용 접촉시간영역 중 0.00004초를 적용하였으며 이때 응력파의 파장은 16cm이고 파장의 1/5, 1/8, 1/16, 1/30에 해당하는 요소크기를 결정하여 수치해석을 수행하였다. 각 요소크기에 따른 해석결과는 표 2에 나타낸 바와 같다.

표 2 요소크기에 따른 수치해석 결과

요소크기 (cm)	공진주파수 (Hz)	P파 속도 (m/s)	두께계산 (cm) $T=C_{PP} / 2f$	오차 (%)
0.5 ( $\lambda/30$ )	19531.25	3919.2	10.033	0.33
1 ( $\lambda/16$ )	19531.25		10.033	0.33
2 ( $\lambda/8$ )	20507.8		9.556	-4.44
3 ( $\lambda/5$ )	21484.38		9.121	-8.79

### 2.3.3 해석시간간격의 결정

효율적인 해석시간간격의 결정을 위하여 본 연구에서는 요소크기가 0.5cm인 경우에 대하여 0.00002, 0.00001, 0.000001초의 해석시간간격으로 수치해석을 수행하였다. 해석결과는 각 시간간격별로 표 3에 정리하였다. 결과에서 보는 바와 같이 적당한 측정시간 간격을 사용하지 않았을 경우 해석상의 오류가 크게 증가하고 있으며, 이는 파의 전파특성을 효과적이고 정확히 묘사하기 위하여 적당한 해석시간간격을 선정하여야 한다는 것을 의미하고 있다. 또한 P파의 속도로 하나의 사각형 요소를 통과하는 전파시간을 감안하여 볼 때 해석시간간격이 전파시간(0.000001275)보다 작은 경우 정확한 수치결과를 얻음으로써 해석시간간격의 결정시 반드시 고려해야 할 사항임을 확인하였다.

표 3 해석시간간격에 따른 수치해석 결과

해석시간간격 (sec)	공진주파수 (Hz)	P파 속도 (m/s)	하나의 요소를 통과하는 P파의 전파시간 (sec)	두께계산 (cm) $T=C_{PP} / 2f$	오차 (%)
0.00002	4882.8	3919.2	0.000001275	측정불가	-
0.00001	17578.125			11.148	11.48
0.000001	19531.25			10.033	0.33

수치해석시 선행과제를 통해 알아본 충격하중의 접촉시간과 해석시간간격, 요소크기에 대한 결과를 표 4에 정리하였으며, 수치예제에 대한 변수결정시 이를 적용하여 해석하였다.

표 4 해석 시간간격 및 유한요소크기의 최적화

파 장 ( $\lambda$ )	요소크기 ( $l_e$ )	해석시간간격 ( $\Delta t$ )	비 고
$C \cdot T$	$l_e = \lambda/10$ 이하	$\Delta t = l_e / C$ 이하	C : P파 속도 T : 접촉시간

## 2.4 SASW 기법의 해석변수 결정

### 2.4.1 해석변수의 결정을 위한 기본가정 및 수치모형

해석변수의 결정을 위해 다음과 같은 기본 가정을 설정하였으며 수치해석을 통해 가정의 가부를 판단함으로써 해석변수의 최적화를 수행하였다.

- 가정 1) 해석시간간격은 SASW 기법이 표면파의 분산특성을 이용한 기법임을 고려하여 표면파(R파) 도를 이론적으로 계산하고 R파가 하나의 요소를 전파하는 시간을 최적의 해석시간간격이라 가정한다.
- 가정 2) 요소크기는 기존의 연구결과(Kuhlemeyer-Lysmer, 1973)를 참고하여 요소크기가 파장의 1/10이하에서 파의 전파특성을 효율적으로 묘사할 수 있다고 가정하고 SASW 기법을 이용한 수치해석시 파장의 길이의 1/10이하의 요소크기를 사용한다.

응력파의 파장을 결정하기 위하여 수치해석시 적용된 충격하중의 접촉시간에 따른 R파의 최소 파장을 사용하였다. 해석변수의 결정을 위한 수치모형은 그림 4와 같으며 입력된 변수들은 표 5에 나타내었다

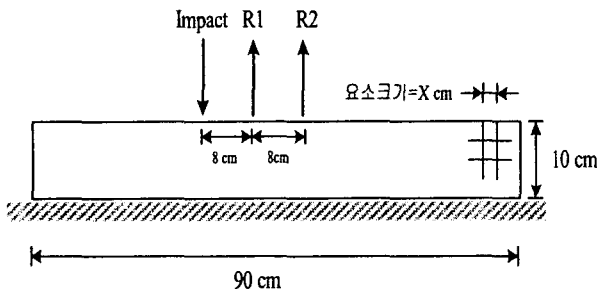


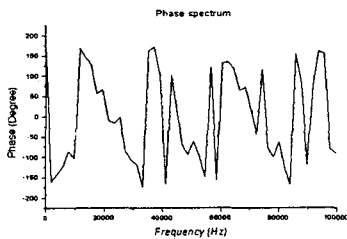
그림 4 SASW 기법 수치해석 모델링

표 5 입력물성치 및 해석변수

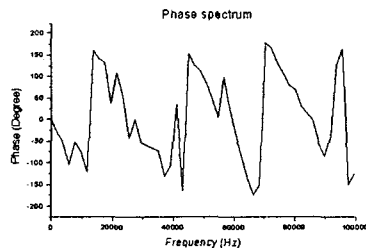
입력물성치			
탄성계수 (Gpa)	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	포아송비	
22.5	2400	0.2	
해석변수			
요소크기	해석시간간격	접촉시간	해석시간
0.5	0.000001~0.00001초	0.00002	0.0005

### 2.4.2 수치해석을 통한 가정 1)의 타당성 검토

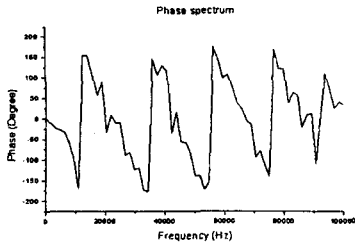
가정 1)의 타당성을 검토하기 위하여 요소크기가 0.5cm인 경우에 대해 해석시간간격을 0.000001, 0.000002, 0.0000025, 0.000005초로 하여 수치해석을 수행하였다. 일반적으로 균질한 매질에서의 이론적인 위상각 스펙트럼의 형태는 간격이 일정한 톱니모양의 직선형태가 나타나야 하며 만약 불규칙한 형태가 나타나게 되면 정확한 표면파 속도의 분산곡선을 도출할 수 없게 된다. 따라서 본 절에서는 해석시간간격에 따른 위상각 스펙트럼의 형태를 비교해 봄으로써 적절한 해석시간간격을 결정하려 하였다. 그림 5는 수치해석을 통해 얻은 위상각 스펙트럼을 나타낸 것이다.



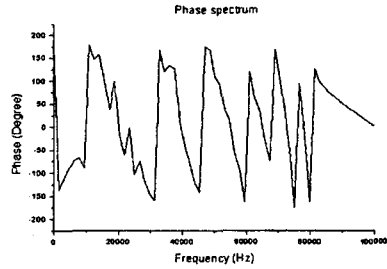
a) 해석시간간격 = 0.000001초



b) 해석시간간격 = 0.000002초



c) 해석시간간격 = 0.0000025초



d) 해석시간간격 = 0.000005초

그림 5 해석시간간격에 따른 위상각 스펙트럼

그림에서 보여주듯이 해석시간간격이 0.000002초와 0.0000025초인 경우에는 비교적 간격이 일정한 직선형태를 보이고 있지만 0.000001초와 0.000005초에서는 매우 불규칙한 형태의 위상각 스펙트럼을 보이고 있다. 이론적으로 계산한 R파의 속도(1714.6m/s)로 하나의 요소(0.5cm)를 전파하는 시간은 0.0000029초이며 0.0000025초의 해석시간간격은 R파의 전파시간에 가장 근접한 것을 알 수 있다.

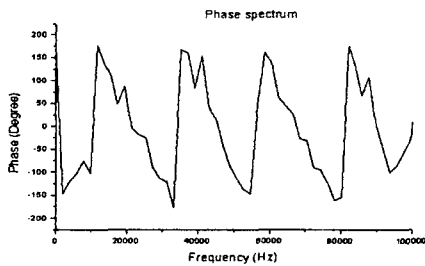
해석시간간격은 R파의 전파시간을 고려하여 결정해야 하며 전파시간에 비해 너무 작은 해석시간간격이나 큰 해석시간간격에서는 정확한 위상각 스펙트럼을 도출할 수 없음을 수치해석을 통해 알 수 있다.

### 2.4.3 수치해석을 통한 가정 2)의 타당성 검토

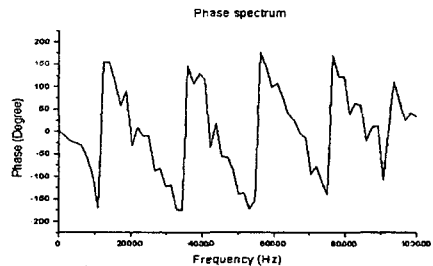
가정 2)에 대한 타당성을 검토하기 위한 수치해석으로 요소크기 0.25, 0.5, 1, 2cm에 대해 각각 R파의 전파시간을 고려한 해석시간간격을 적용하여 수치해석을 수행하였다. R파의 최소파장의 길이는 3.5cm이며 수치해석을 위한 요소크기는 각각 파장의 1/14, 1/7, 1/4, 1/2에 해당한다. 표 6은 요소크기에 따른 해석시간간격을 정리한 것이며, 수치해석을 통해 얻어진 위상각 스펙트럼은 그림 6에 나타내었다.

표 6 요소크기에 따른 해석시간간격

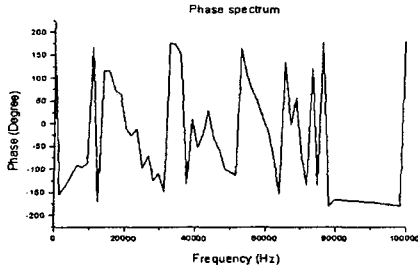
요소크기 (cm)	R파 전파속도 (m/s)	하나의 요소를 전파하는 시간 (sec)	적용 해석시간간격 (sec)
0.25	1714.6	0.0000014	0.000001
0.5		0.0000029	0.0000025
1		0.0000058	0.000005
2		0.0000107	0.00001



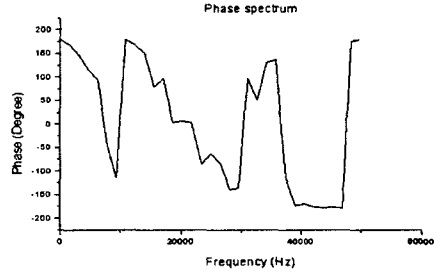
a) 요소크기 = 0.25cm



b) 요소크기 = 0.5cm



c) 요소크기 = 1cm



d) 요소크기 = 2cm

그림 6 요소크기에 따른 위상각 스펙트럼

그림에서와 같이 요소크기가 파장의 약 1/7인 0.5cm 이하에서는 위상각 스펙트럼이 비교적 툽니모양의 직선형태를 나타내고 있지만 파장의 1/4, 1/2인 경우 불규칙한 형태를 보이고 있다. 이러한 결과는 요소크기가 파장의 1/10 이하인 경우 파의 전파형태를 효율적으로 묘사할 수 있다는 기존의 연구와 일치함을 보이고 있으며 SASW 기법의 수치해석에서도 요소크기가 파장의 1/10 이하를 사용하여야 함을 의미하고 있다. 따라서 가정 2)는 타당성이 있다고 할 수 있으며 수치해석의 적용성을 검토하기 위한 수치예제에서도 요소크기를 파장의 1/10 이하로 하여 수치해석을 수행하였다.

### 3. 수치해석 및 결과분석

#### 3.1 충격반향기법

##### 3.1.1 수치해석을 통한 내부공동 위치측정

본 절에서는 충격반향기법을 이용한 내부공동의 위치를 측정하는 수치해석의 적용성을 알아보기 위하여 두께 30cm의 시험체에 각각 10, 20cm 깊이의 공동을 모형화하여 수치해석을 수행하였다. 그림 7은 수치해석을 위한 모형을 보여주고 있으며, 입력물성과 해석변수는 표 7에 정리하였다.

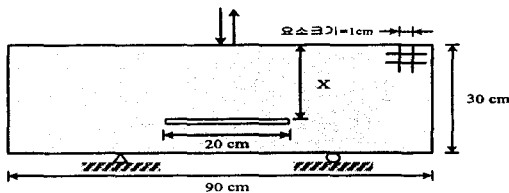
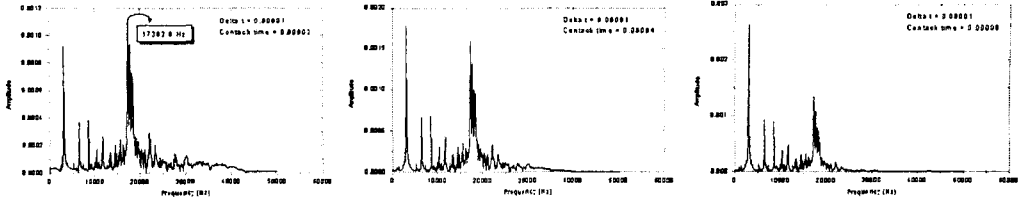


그림 7 내부공동 위치측정을 위한 수치모형

표 7 입력물성 및 해석변수

입력물성치		
탄성계수 ( $GPa$ )	밀도 ( $kg/m^3$ )	포아송비
36	2400	0.2
해석변수		
요소크기 ( $cm$ )	해석시간간격 ( $sec$ )	
1	0.00001	

충격반향기법을 이용한 내부결함탐사에 대하여 Sansalone과 Carino(1986)의 연구에서는 충격하중의 접촉시간이 P파의 전파시간에 3/4이하여야만 결함을 탐사할 수 있다고 하였으며, 본 연구에서는 충격하중의 접촉시간을 달리하여 수치해석을 수행함으로써 Sansalone 등이 제시한 이론의 타당성과 수치해석의 적용성을 알아보려 하였다. 그림 8은 공동깊이가 10cm인 경우에 대해 0.00002초, 0.00004초 그리고 0.00006초의 접촉시간을 적용하여 수치해석을 수행한 결과이다.



a) 접촉시간 0.00002초      b) 접촉시간 0.00004초      c) 접촉시간 0.00006초

그림 8 두께 10cm(해석시간 : 0.01초) 수치해석결과

내부공동 10cm까지의 P파의 전파시간은 약 0.00005초이며, 수치해석결과 P파 전파시간의 3/4(0.0000375초)보다 작은 0.00002초에서 정확한 공동위치를 측정할 수 있었다. 이는 Sansalone 등의 이론과 일치함을 보여주는 것이며 수치해석의 적용성을 입증하는 결과라 할 수 있다.

### 3.2 층상구조에 대한 SASW 기법의 수치해석

본 절에서는 해석변수에 대한 연구를 통하여 알아본 요소크기와 해석시간간격 및 SASW 기법에 대한 수치해석의 적용성을 알아보기 위하여 임의의 층상구조를 모형화하여 수치해석을 수행하였다. 층상구조는 두 층을 이룬 층상구조와 세 층을 이룬 층상구조를 모형화하였고 적용된 해석변수로 요소크기는 최소파장의 1/10로 하였으며, 해석시간간격은 첫 번째 층의 R파 속도를 계산하여 하나의 요소를 전파하는 시간으로 하였다. 또한 수치해석결과에서 얻어진 가속도 데이터를 FFT하여 위상각 스펙트럼과 표면파 분산곡선을 도출함으로써 각 층의 표면파 속도와 경계면의 위치를 알아보았다. 층상구조에 대한 수치모형은 그림 9와 같으며 해석변수는 표 8에 정리하였다.

표 8 입력물성 및 해석변수

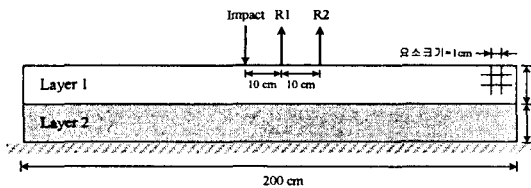


그림 9 수치해석 모델링

입력물성치			
탄성계수 (GPa)	밀도 ( $kg/m^3$ )	포아송비	
29, 10	2400	0.2	
해석변수			
요소크기	해석시간간격	접촉시간	해석시간
0.5	0.0000025	0.00002	0.0005

상부층과 하부층의 탄성계수를 각각 29, 10GPa로 하여 층상구조를 모형화 하였고 수치해석을 위하여 결정된 요소크기는 충격하중의 접촉시간에 의해 계산된 최소 파장의 약 1/10인 0.5cm이며, 해석시간간격은 상부층의 R파 속도(1956.16m/s)를 계산하여 R파가 요소크기 0.5cm를 전파하는 시간(약 0.0000025초)을 사용하였다. 층상구조를 이루는 모델에 대한 SASW 기법의 수치해석결과에서 얻어진 위상각 스펙트럼은 그림 10에 나타내었다. 위상각 스펙트럼을 살펴보면 주파수 18750Hz부근에서 위상각 차이가 급격하게 변하고 있으며 상부층의 표면파 속도(1956.16m/s)를 사용하여 18750Hz에 해당하는 파장의 길이를 계산하면 10.4cm임을 알 수 있다. 이는 약 10.4cm에서 경계면이 존재하고 있음을 의미하는 것이며, 그림 11에서 보여주고 있는 표면파의 분산곡선에서도 같은 결과를 보이고 있다. 표 9는 분산곡선을 통해 얻어진 각 층의 표면파 속도를 정리한 것이다.



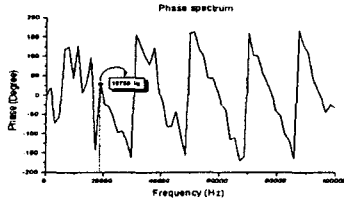


그림 10 위상각 스펙트럼

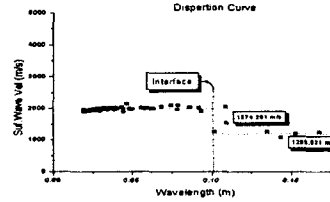


그림 11 층상구조의 분산곡선

표 9 층상구조의 SASW 기법을 이용한 표면파 측정

구분	수치결과 (m/s)	이론값 (m/s)	오차 (%)
Layer 1	1974.291	1956.16	1.4
Layer 2	1264.807	1196.57	5.7

#### 4. 결 론

본 연구에서는 응력파를 이용한 비파괴 탐상기법 중 충격반향탐상기법에 대한 수치해석의 적용성을 검토하기 위하여 수치해석을 수행하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 수치해석의 정확성과 프로그램의 효율적인 운용을 위해 해석변수에 대한 선행연구를 수행하였으며 그 결과, 비파괴 탐상기법의 종류 및 대상 모형에 따라 정확한 수치결과를 얻을 수 있는 유한요소크기 및 해석 시간간격을 결정하였다. 특히 충격반향기법에 대한 해석변수 결정시 충격하중의 접촉시간이 해석결과에 많은 영향을 미치며 모델의 두께 및 강성에 따라 적절한 운용이 이루어져야 함을 알 수 있다.
- 2) 임의의 모델에 대한 비파괴 탐상기법의 수치해석결과가 적절한 해석변수를 사용하는 경우 높은 정확성을 보이고 있음을 알 수 있으며, 비파괴 탐상기법의 검증수단으로서의 적용성을 확인할 수 있다.
- 3) 비파괴 탐상기법과 적용모델에 대한 보다 다양한 연구를 통해 통합적인 검증수단으로서 수치해석 프로그램의 개발이 필요하며 기존의 실험적인 이론에 대한 검증이 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업과 교육인적자원부의 BK21 사업의 재정지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. Kuhlemeyer, R. L., Lysmer, J., (1973) Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. *J. Soil Mech & Foundations Div.*, ASCE, 99(SM5), pp. 421-427.
2. Sansalone, M., Carino, N. J., (1990) Finite Element Studies of The Impact-Echo Response of Layered Plates Containing Flaws. in *International Advances in Nondestructive Testing*, 15th Ed. W. McGonagle, Gordon & Breach Science Publishers, New York, pp. 313-336.
3. 김동수, 윤종구, 김두기 (2000) SASW 기법에 대한 수치해석 적용성 연구. 한국지반공학회 논문집, 제17권, 제1호, pp. 67-76.